

**Pourquoi un nouveau modèle ?** Bien qu'il n'existe pas de modèle spécifiquement dédié à la dynamique relative des forêts et des savanes tropicales humides, des modèles ont déjà été consacrés à la dynamique relative de deux écosystèmes. Trois types de modèles sont disponibles :

1. les simples analogies avec des systèmes dynamiques simples existant par ailleurs : percolation, etc. qui si elles étaient appliquées à un problème spécifique n'apporteraient rien de neuf.
2. les modèles spécifiquement dédiés à un problème similaire pour lesquels l'effort d'adaptation serait aussi important que celui de modélisation et ne serait pas satisfaisant du point de vue théorique.
3. les plates formes adaptables : comme elles ont une portée générale, il peut être difficile de les adapter en un modèle simple.

Enfin, construire un nouveau modèle, c'est-à-dire en déterminer les mécanismes et les coder numériquement, apparaît comme la solution la plus simple.

## 2.3 Paysages tropicaux : description et évolution.

Actuellement, la forêt tropicale humide progresse sur ses marges : c'est l'un des premiers résultats de l'écologie tropicale. Cette affirmation surprend, tant elle va à l'encontre de l'image commune d'une forêt fragile, en régression sous l'action de l'homme. L'objet de ce paragraphe est de résumer l'état des connaissances afin de mettre en lumière ce constat ainsi que la façon dont il faut le tempérer.

### 2.3.1 Savanes et forêts tropicales

La région tropicale, la zone intertropicale, les tropiques : ces termes désignent la région du monde située autour de l'équateur et soumise aux climats équatoriaux et tropicaux.

**Mouvement de la Terre et circulation atmosphérique.** L'atmosphère [77] reçoit de la chaleur du soleil, soit directement, soit par l'intermédiaire du sol et en perd par rayonnement. La différence entre chaleur reçue et perdue est le bilan radiatif. En moyenne annuelle, la chaleur reçue est plus intense dans la région de l'équateur et décroît vers les pôles : le bilan radiatif est positif jusqu'aux latitudes 35° Nord et Sud et négatif au-delà. Du point de vue atmosphérique, il y a, de ce fait, deux sources froides aux pôles et une source chaude dans la zone intertropicale. La circulation atmosphérique est donc organisée de façon symétrique dans les deux hémisphères : dans chacun d'entre eux, la circulation part des pôles vers les tropiques avant de repartir vers les pôles. L'axe de symétrie de la circulation atmosphérique, situé dans la zone intertropicale, est nommé Equateur Météorologique (EM). C'est un couloir zonal (latitudinal) de basses pressions, encadré des grandes formations anticycloniques (anticyclones des Açores et de Sainte-Hélène dans l'Atlantique Nord et Sud, par exemple).

Dans les deux hémisphères, la force de Coriolis a un sens différent, amenant les anticyclones à tourner en sens inverse. De part et d'autre de l'EM, les courants convergent donc et donnent naissance à des vents d'Est : les alizés.

L'EM ne reste pas fixe au cours de l'année. En effet, l'axe de révolution de la Terre n'est pas perpendiculaire au plan de l'écliptique (le plan dans lequel se meut la Terre dans sa course autour du Soleil) : l'angle sous lequel le Soleil est vu depuis la Terre évolue au cours de l'année ; c'est le mouvement zénithal. Les variations saisonnières de flux de chaleur sont faibles sous les tropiques (où le Soleil est toujours haut dans le ciel) mais très fortes au niveau des pôles (la durée du jour varie de 0 h à 24 h). Ces changements importants au niveau des réservoirs froids modifient considérablement la circulation atmosphérique dans chaque hémisphère et induisent un déplacement de l'axe de symétrie (l'EM), qui suit le mouvement zénithal du soleil (voir figure 2.1).

Sur les continents, le déplacement du maximum d'échauffement au cours de l'année peut en outre affecter le champ de pression et créer des dépressions thermiques dans les plus basses couches de l'atmosphère. Ces dépressions accentuent le déplacement de l'EM vers le Tropique. Les alizés peuvent alors traverser l'Equateur Géographique, subir le changement de sens de la force de Coriolis et se transformer en courants d'Ouest : la mousson. La circulation des plus hautes couches, elle, n'est pas affectée.

Il y a donc la partie haute de l'EM qui subit le changement de circulation atmosphérique dans chaque hémisphère induit par l'évolution des sources froides polaires : c'est l'EMV (EM Vertical, car sa structure est verticale). L'EMV se caractérise par une ceinture de hauts nuages de 300 à 500 kilomètres de large, provoquant au sol des précipitations abondantes et régulières. Dans les basses couches, la trace au sol de l'EM (que l'on trouve couramment appelé ITCZ, pour Intertropical Convergence Zone) subit, à cause des dépressions thermiques continentales, des deflexions plus importantes. La surface de raccordement entre les deux parties est inclinée dans les moyennes couches (EMI) : cette surface correspond au FIT (Front InterTropical de convergence). Dans cette zone, les précipitations prennent la forme de pluies orageuses et aléatoires.

**Climats des Tropiques.** L'oscillation de l'EM détermine les caractéristiques du climat de la région intertropicale : alternance d'une saison des pluies lorsqu'il passe, et d'une saison sèche lorsque il se retire et laisse place aux hautes pressions (figure 2.2).

La définition du caractère sec ou humide de la saison est délicat à définir [76]. La façon la plus simple est de considérer le rapport  $P/T$  entre le montant des précipitations mensuelles et la température moyenne mensuelle : le mois est sec si  $P/T < 2$  et humide sinon (figure 2.3). Une description plus fine mais plus difficile fait intervenir la comparaison entre l'évapotranspiration de la végétation (flux de vapeur d'eau de la végétation vers l'atmosphère) et le flux d'eau vers la végétation à travers les précipitations et les réserves d'eau du sol.

La durée et l'importance de la saison sèche dépendent de l'éloignement à l'Equateur et des conditions locales particulières. Deux types de climat en résultent [77].

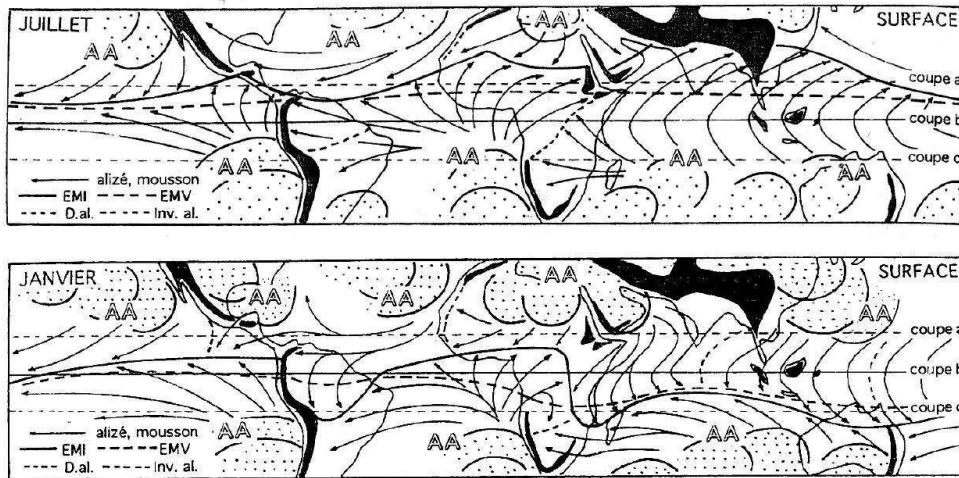


FIG. 2.1 – Positions extrêmes de l'Equateur Météorologique Vertical (EMV) et de la trace au sol de l'Equateur Météorologique Incliné (EMI) en janvier et en juillet. Les flèches représentent les vents dominants alizés et mousson. AA : position des formations anticycloniques océaniques encadrant l'EM. D'après Leroux [77].

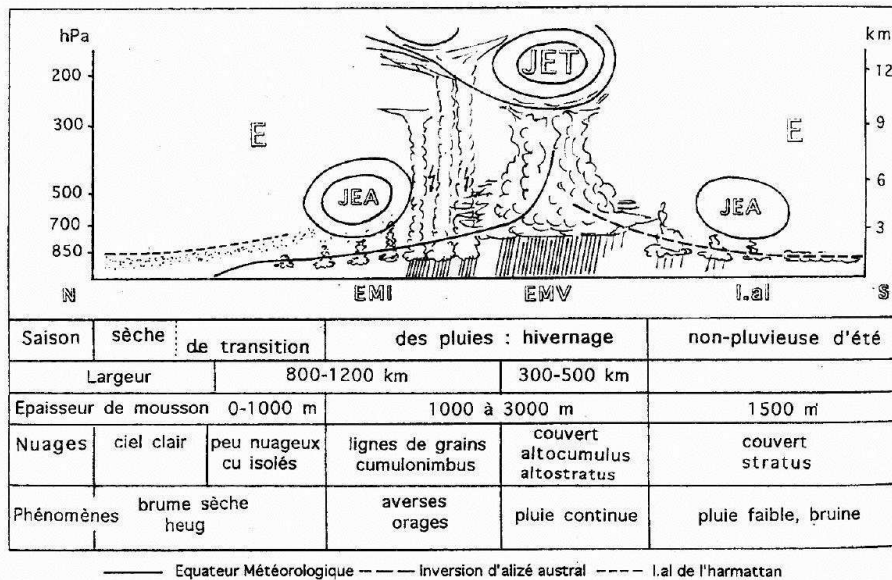


FIG. 2.2 – Coupe transversale de l'atmosphère au niveau de l'Equateur Météorologique et type de temps au sol. D'après Leroux [77].

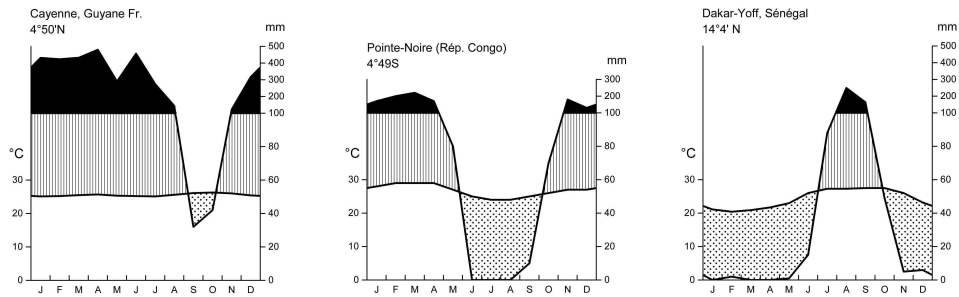


FIG. 2.3 – Diagrammes ombrothermiques correspondant : a) au climat équatorial b) au climat tropical humide c) au climat tropical sec. Les points correspondent aux mois secs (courbes de précipitations sous la courbe des températures, c'est-à-dire un rapport  $P/T < 2$ ), les hachures verticales aux mois humides et les zones noires (échelle différente des précipitations) aux mois perhumides (plus de 100  $mm$  de précipitation mensuelle). Les données sont tirées de [44].

Le climat équatorial se caractérise par une certaine uniformité des conditions climatiques au cours de l'année : basses pressions, peu de contraste thermique et précipitations toujours abondantes (plus de 1500  $mm$  par an, jusqu'à 9000  $mm$  par an en Colombie ou 11000  $mm$  au pied du Mont Cameroun). C'est le climat des zones où l'amplitude d'oscillation de l'EM est faible (Panama, Nouvelle-Guinée) et des régions où des mécanismes pluviogènes locaux, dûs à la topographie ou au couvert végétal (Amazonie, Bassin du Zaïre) compensent au moins en partie ces oscillations. Dans ces régions, il n'y a pas à proprement parler de saison sèche mais une ou deux périodes de moindre pluviométrie par an (figure 2.3.a).

On parle de climat tropical humide lorsque les deux saisons sont clairement définies : une saison humide, d'une durée supérieure à trois mois (c'est l'hivernage) et une saison sèche, d'une durée supérieure à deux mois (figure 2.3.b). Lorsque la saison sèche est très longue, le climat est dit tropical sec (figure 2.3.c).

**Climax.** Le climax est « la formation optimum correspondant à un milieu déterminé » [34]. C'est la formation végétale qui s'installerait en un endroit particulier, sous des conditions particulières si on la laissait évoluer suffisamment longtemps ; c'est l'état d'équilibre de la végétation avec son milieu. La notion de climax est souvent critiquée. Elle conserve néanmoins sa pertinence tant qu'on garde à l'esprit l'influence du temps sur trois points. Le premier point est qu'il s'agit d'un état d'équilibre dynamique : les plantes poussent et meurent, sont remplacées par d'autres, etc. Mais de manière globale la formation végétale peut être définie. Le second est que le climax est l'état vers lequel tend le système et non l'état dans lequel on peut l'observer en un instant donné. Ce qu'on observe ne peut être qu'une étape dans le développement de la formation d'équilibre. Le troisième point est que le climax peut ne pas être atteint parce que le temps de développement de cette formation peut être plus long

que le temps caractéristique de changement des conditions environnementales et donc de la nature de ce climax.

En retenant ces réserves à l'esprit, on peut décrire la végétation climacique des régions tropicales, en fonction des deux grandeurs climatiques principales : le montant des précipitations annuelles et la durée de la saison sèche. La combinaison de ces deux facteurs détermine le type de végétation : forêt ou savane (figure 2.4).

**Forêts humides.** La forêt est un écosystème dominé par des arbres hauts dont les couronnes sont jointives et dont la strate herbacée est absente ou faible.

Les forêts tropicales humides sont généralement denses<sup>9</sup>, nécessitent un climat très humide (précipitations annuelles importantes et/ou courte saison sèche) et sont caractérisées par un microclimat intérieur : l'humidité et la température sont régulées (80 – 100% d'humidité, 24 – 28°C). Deux grandes classes de forêts humides se distinguent. Les forêts tropicales sempervirentes (toujours vertes : les arbres renouvellent leurs feuilles au fur et à mesure sans défeuillaison complète) sont situées dans une bande autour de l'équateur où les précipitations sont les plus importantes : dans le bassin de l'Amazone, dans celui du Congo, en Indonésie, etc. Ces forêts sont caractérisées par une très grande diversité biologique associée à un taux d'endémisme élevé.

Les climats un peu moins humides (saison sèche plus longue ou moins de précipitations) voient l'installation de forêts tropicales humides semi-décidues (ou semi-caducifoliées : dont une partie des espèces ligneuses (arbres) perdent leurs feuilles au cours de la saison sèche). Les arbres de ces forêts sont moins diversifiés et ont une aire de répartition plus vaste.

Bien qu'elles ne soient pas concernées par cette étude, il faut mentionner les forêts claires qui s'installent sous un climat tropical plus aride. Ces forêts sont très différentes des forêts humides aussi bien du point de vue physiologique que du point de vue des relations avec les savanes périforestières.

	Amérique du Sud	Afrique	Sud-Est Asiatique	Total
Forêt	612	185	245	1042
Mosaïque forêt-savane	91	13	20	124
Savane	271	97	60	428
Formations anthropisées	181	42	120	343
Total	1155	337	445	1937
% Forêt	57%	57%	61%	58 %

TAB. 2.1 – Surfaces occupées (en 10<sup>6</sup> ha) en 1997 par différents types d'écosystèmes dans la région tropicale humide, d'après Achard et coll. [28]. La ligne % Forêt prend en compte la part de forêt de la classe Mosaïque.

<sup>9</sup>Il faut néanmoins mentionner l'existence de forêts clairsemées et de forêts marécageuses dans des conditions particulières.

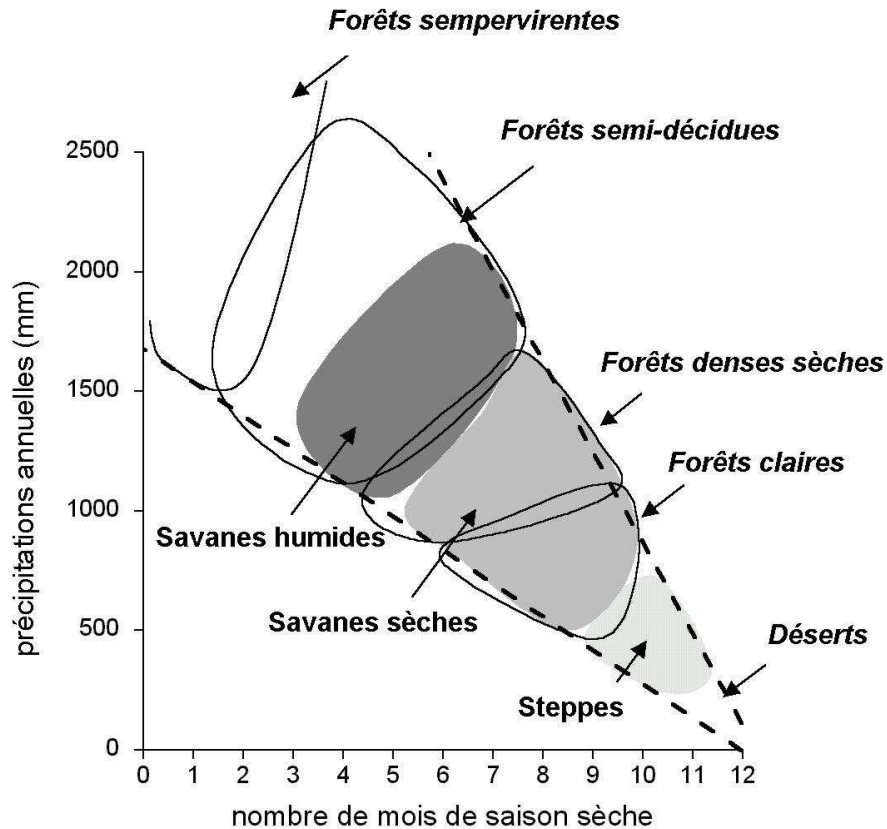


FIG. 2.4 – Relation grossière entre végétation et les deux principaux déterminants climatiques tropicaux : le montant des précipitations et la longueur de la saison sèche. Les deux lignes pointillées représentent les possibilités climatiques. Les zones blanches représentent les différentes formations forestières des conditions les plus humides vers les plus sèches. Les domaines de savane recouvrent les domaines de forêt. pour expliquer les chevauchements il faut considérer des facteurs non pris en compte ici : soit un paramètre du système (nature du sol, actions anthropiques) soit simplement le temps. D'après Lüttge [80]

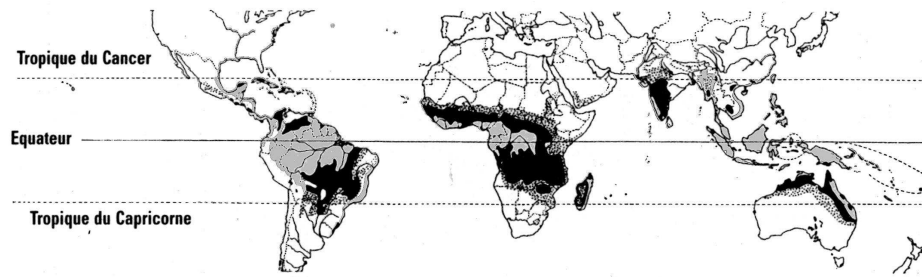


FIG. 2.5 – Répartition des grands types de végétation tropicale. En gris : forêts tropicales humides. En noir : savanes humides et savanes arborées. Points : savanes sèches. D'après Riou [95] et Simon [105].

**Savanes.** La savane est quant à elle une formation végétale formée d'un tapis herbacé continu (composé principalement de hautes graminées pérennes) et d'une strate arbustive. Selon l'importance de cette dernière on distingue : les savanes arborées, où les arbres et arbustes forment un couvert clair ; les savanes arbustives, parsemées d'arbustes ; les savanes herbeuses. Ces formations se trouvent dans les zones tropicales non propices à la forêt, soit que l'humidité y est insuffisante (trop faible pluviométrie, trop longue saison sèche) et on parle alors de savanes climatiques, soit que le sol ne puisse pas accueillir de forêt (marécages, cuirasses ferrugineuses et roches) : ce sont les savanes saxicoles ou édaphiques.

**Savanes humides.** Très tôt, des études ont montré que beaucoup de savanes périforestières n'étaient ni climatiques ni saxicoles, mais semblaient persister dans des conditions suffisantes pour l'installation de la forêt [29, 34]. Ces savanes sont parcourues par de nombreuses forêts galeries et îlots forestiers. On trouve des savanes de ce type un peu partout sous les tropiques : les savanes guinéennes en Afrique de l'Ouest, les campos cerrados ou Llanos en Amérique Latine, en Asie (Vietnam) [29]. On a beaucoup discuté sur l'origine de ces savanes, en particulier si elles étaient l'héritage d'une phase plus sèche dans le passé [35] ou si elles avaient été créées par l'homme à partir de la forêt [47, 93].

La zone de transition entre ces deux formations met en présence la forêt humide et les savanes herbeuses ou arbustives qualifiées de périforestières. Elle prend l'aspect d'une mosaïque forêt-savane, avec des savanes incluses dans la zone de forêt et des tâches de forêt au milieu de la savane. Cet aspect de mosaïque, d'imbrication d'un domaine dans l'autre, se retrouve à diverses échelles (voir les planches 1 à 3). Selon une étude récente [28], la surface occupée par les savanes humides représente 40% de la surface occupée par les forêts humides. C'est considérable si on considère cette surface comme un potentiel de conquête pour la forêt.

### 2.3.2 Influence des facteurs anthropiques

La zone de contact entre la forêt et la savane n'est pas uniformément peuplée. On y trouve des villes importantes, qui attirent de plus en plus de gens. D'autres endroits, parsemés de villages, où les activités traditionnelles sont en général maintenues, subissent l'exode rural.

**Cultures.** Le sol tropical est peu fertile [80]. Le système agricole traditionnel [54] en savane comme en forêt est celui de l'agriculture itinérante (*shifting-field cultivation*) reposant généralement sur une alternance d'une courte période de cultures (2/4 ans) et d'une longue période de jachère (10/15 ans). Le cycle commence par une libération de l'espace par l'abattage des arbres (à la machette ou à la tronçonneuse). Le bois coupé est ensuite brûlé, les cendres servant d'engrais. Les grands arbres émergents sont généralement préservés. Le rendement diminue très vite, à mesure que le sol, peu fertile, s'épuise. Le champ est alors abandonné (au bout de 3 ou 4 années) et la végétation naturelle envahit petit à petit la zone, avant d'être de nouveau défrichée. Cette forme d'exploitation paraît tout à fait adaptée à la forêt tropicale humide [54], même si le cortège floristique de la forêt pendant la période de jachère (forêt secondaire) est plus pauvre que celui de la forêt originelle (forêt primaire).

**Feux courants de savane.** Le feu est un phénomène caractéristique des savanes [99], pas forcément anthropogène : même dans les régions non peuplées, la foudre ou la fermentation d'herbes dans les savanes denses [84] peuvent provoquer une mise à feu naturelle. Néanmoins, la plupart des feux sont provoqués par l'homme. Si certains sont accidentels (un mégot de cigarette, etc.), la mise à feu de la savane est également une activité traditionnelle des populations locales. Les objectifs sont multiples [99] : pour assainir les environs des maisons (ce sont alors de petits feux contrôlés, allumés en début de saison sèche et le soir, qui permettent également d'éviter que les feux de plus grande ampleur n'arrivent près des habitations) ; « débroussailler » la savane sur une grande échelle et en faciliter l'accès ; rabattre le gibier vers les chasseurs ; faire paître de jeunes pousses par les troupeaux. Le feu obéit également à des facteurs moins objectifs : par habitude, par pyromanie ou tout simplement par le besoin d'avoir une vue dégagée. De toute façon, le feu n'a jamais pour objectif d'avoir un impact direct sur la forêt ou sur la progression de la forêt : la mise à feu obéit à des préoccupations beaucoup plus immédiates, liées à la savane elle-même.

**Expériences de contrôle de feu.** Le tableau 2.2 résume les endroits des quelques expériences menées pour mesurer l'influence du feu sur la dynamique de conquête des zones de savane par les espèces de forêt. Il s'agit de comparer l'évolution de parcelles de forêt préalablement défrichées préservées totalement du feu et d'autres soumises à différents régimes de feux (en général, différentes époques de mise à feu pour comparer les effets des feux précoces et tardifs ou différentes fréquences de mise à feu).

Les résultats des différentes études sont assez comparables :



Site	Années	Types de parcelles	Références
Kokondékro (Côte d'Ivoire)	1937–1961	P.I. ; F.P. ; F.T.	[29]
Olokomeji (Nigeria)	1929–1957	P.I. ; F.P. ; F.T.	[99]
Ndola (Zambie)	1933–1956	P.I., F.P., F.T.	[110]
Red Volta (Ghana)	1949–1960–1977	P.I. ; F.P. ; F.T.	[41]
Kpong (Ghana)	1949–1960–1977	P.I. ; F.P. ; F.T.	[106]
Recor–JBB (Brésil)	1972–1993	P.I. ; F.1/2	[85]

TAB. 2.2 – Synthèse des différents emplacements d'expériences de mise en défens de savane. Les différents types de parcelles sont : P.I. : protection intégrale contre les feux. F.P. : mise à feu chaque année en début de saison sèche (feux précoces). F.T. mise à feu chaque année en fin de saison sèche (feux tardifs). F.1/2 : feux un an sur deux.

1. La densité d'arbres et la surface terrière décroissent avec l'intensification de la perturbation.
2. A l'inverse, le couvert herbacé augmente avec l'intensification de la perturbation : il brûle plus, mais se reconstitue mieux du fait de la quantité de lumière plus importante.
3. Les sols ne semblent pas affectés significativement par la protection contre les feux (aussi bien dans leur composition que dans leur caractéristique chimique).

**Expérience de dégradation de la forêt humide.** En 1960-1962, une expérience a été menée en Côte d'Ivoire [29] consistant à tenter la création d'une savane incluse en forêt. 2000  $m^2$  de forêt ont d'abord été coupés et brûlés après que les souches furent déracinées. Malgré l'importation massive de graines d'herbes de savane et une lutte intensive contre les espèces forestières, la parcelle ressemblait finalement plus à une brousse forestière qu'à une savane incluse. Cette expérience vient confirmer la thèse selon laquelle une création de savane par accident à partir d'une forêt dense est quasi-impossible et un tel phénomène ne peut en tout cas pas expliquer le grand nombre de savanes incluses.

Cette expérience a d'ailleurs été confirmée par la transformation des forêts ivoiriennes suite à la déforestation causée par la pression agricole, non en savanes mais en brousses forestières bloquantes, c'est-à-dire empêchant la régénération de la forêt dans sa structure originelle.

**Activités modernes.** Les activités modernes ont induit un changement d'échelle sensible : de l'utilisation locale des ressources on est passé à une utilisation d'ampleur nationale voire mondiale. Parmi ces activités, il faut citer :

- l'exploitation forestière ;
- les plantations et la culture de rente ;
- la conversion des grandes zones de forêts en systèmes agricoles (front pionniers) ;

- les infrastructures qui perturbent l'écosystème (routes, voies ferrées, pipelines)

D'autre part, l'urbanisation croissante pose d'une part la question du devenir des forêts proches des villes, mais également (et peut-être surtout) celle de l'organisation des flux entre la ville et les zones rurales (charbon de bois, viande de brousse, etc.). Si les perturbations induites par les activités modernes sont loin d'être négligeables, elles sont néanmoins généralement localisées.

### **2.3.3 Bilan dynamique : évolution des limites forêt-savane dans le passé récent**

Les activités humaines sont donc peu favorables à la conservation de la forêt, qui est perçue comme une ressource et non un écosystème à préserver. A ce titre, les savanes humides ont d'abord été perçues comme créées par l'homme à partir de la forêt [34]. Des études de reconstruction de l'histoire passée et d'observation de la dynamique actuelle sont venues renverser cette perception.

**Climat actuel et passé.** Le climat actuel détermine le point d'attraction de l'écosystème (vers quelle type de formation il tend) tandis que le climat passé détermine d'où il vient (les conditions initiales en quelque sorte). Si une phase sèche succède à une phase humide, la forêt n'est plus en équilibre avec le milieu et évolue vers des formations plus claires ou vers une savane. A contrario, si une phase humide propice à la forêt succède à une phase sèche, une savane est progressivement afforestée.

**Reconstitution du climat et de la végétation passés.** L'analyse des sédiments accumulés au cours des millénaires, extraits sous forme de carottes, permet de reconstituer l'histoire des climats et de la végétation. Des indicateurs de nature très différentes sont utilisés. Les macro-restes végétaux (charbons, graines, feuilles, racines) permettent de dater (en utilisant l'isotope  $^{14}\text{C}$  du carbone) certains points de la carotte. D'autres éléments végétaux (dont la forme est caractéristique de l'espèce, du genre ou de la famille du végétal qui le produit) résistent au temps : les enveloppes des pollens ou des spores, les phytolithes (précipités siliceux situés dans et entre les cellules des plantes). Les abondances relatives permettent de reconstituer la végétation environnante.

Les isotopes du carbone sont également utilisés. L'isotope  $^{14}\text{C}$  est bien connu : il a une demi-vie de  $5730 \pm 30$  ans (le temps qu'il faut pour que la moitié des atomes de  $^{14}\text{C}$  disparaisse). En mesurant la densité résiduelle de  $^{14}\text{C}$ , on peut dater un échantillon. On parle d'âge  $^{14}\text{C}$  si on utilise comme base de comparaison la concentration actuelle de l'isotope  $^{14}\text{C}$  et qu'on utilise une demi-vie de 5768 ans (valeur utilisée lors des premières mesures). On parle d'âge calendaire (cal.), ou d'âge réel, si on prend en compte la bonne valeur de la demi-vie et les fluctuations de la concentration de  $^{14}\text{C}$  dans l'atmosphère dans le passé. On utilise aussi l'isotope  $^{13}\text{C}$  du carbone (isotope stable mais beaucoup moins abondant que l'isotope majoritaire  $^{12}\text{C}$ ). Les plantes assimilent mal cet isotope lors de la photosynthèse, ce qui se traduit par une abondance moindre dans

Marqueur	Usage
Isotope $^{14}C$	Datation
Isotope $^{13}C$	Plantes en C3 ou C4 Caractère ouvert ou fermé du paysage
Enveloppes des pollens	Végétation environnante. En particulier : Abondance : quantité de graminées et de ligneux Possibilité de détermination de familles ou espèces de ligneux
Phytolithes	Détermination des sous-familles de graminées
Diatomées	Caractéristiques physiques d'un lac

TAB. 2.3 – Exemples de marqueurs recherchés dans les carottes de sédiments avec les caractéristiques qu'ils permettent de déterminer.

les végétaux que dans l'air ambiant. Selon le cycle de photosynthèse, certaines plantes (dites en C3) fixent encore moins bien le  $^{13}C$  que d'autres (dites en C4). En milieu tropical, les plantes de savane sont généralement en C4 et les plantes de forêt sont en C3 : l'étude de l'abondance relative dans les sédiments organiques permet donc de déterminer le caractère ouvert ou fermé du paysage dans le passé.

Concernant l'évolution locale du climat, l'enveloppe siliceuse des diatomées (algues unicellulaires) permet de remonter aux composantes d'un milieu dont elles sont caractéristiques (température, pH, salinité, niveau des lacs, etc...).

Chaque marqueur fournit une information partielle et ce n'est que la confrontation des résultats de différents marqueurs sur un même site et la comparaison entre différents sites qui peut permettre de donner une interprétation des courbes.

**Évolution des lisières lors du passé géologique récent.** La comparaison des résultats issus de différents prélèvements permet de se faire un idée sur l'histoire de la végétation et du climat pendant l'Holocène, c'est-à-dire depuis 10000 ans BP (Before Present, Present étant l'année 1950), en Afrique et en Amérique du Sud. La principale information est que les modifications de la répartition des zones de végétations sous les tropiques durant cette période sont essentiellement d'origine climatique : les changements de climat et de végétation apparaissent en effet clairement corrélés [102].

Au début de l'Holocène, la forêt occupe une surface importante en Afrique comme en Amérique du Sud. Dans le Sud Est et le Nord de l'Amazonie, une phase sèche a provoqué un recul de la forêt au profit de la savane entre 7500 et 4500 ans BP [103]. En Afrique Centrale [111], on note les traces d'une période sèche 4200 et 1300 BP, associée soit à une dégradation de la forêt, dont on ne peut déterminer la nature exacte, soit à un recul des limites forêt-savane vers l'équateur, avec un reforestation récente de certaines zones (< 900 ans BP) malgré l'anthropisation croissante.

**Tendance actuelle à la reprise forestière.** Les conditions climatiques actuelles sont favorables à l'afforestation des savanes en marge du massif forestier humide. Les études de l'évolution actuelle et récente (sur des périodes de

l'ordre de quelques dizaines d'années) attestent cette tendance malgré l'action de l'homme. Différents moyens sont utilisés.

Le signal  $\delta^{13}\text{C}$  permet, par comparaison de différents sites sur un transect perpendiculaire à l'écotone, de déterminer qualitativement l'évolution de la lisière (avance ou recul) mais aussi quantitativement (évaluation de la vitesse de progression) [90, 101]. Une autre méthode consiste à comparer des photos aériennes ou des images satellites de la même zone prises à différents moments [97, 116]. Ces études convergent vers une estimation des vitesses de reconquête de l'ordre de quelques dizaines de mètres par siècle.

## 2.4 Le processus de conquête

Le premier mécanisme essentiel de la dynamique du contact forêt-savane est celui qui permet l'expansion du domaine forestier : l'installation d'arbres de forêt en savane (planche 4).

### 2.4.1 Espèces pionnières de forêt en savane

**Espèces pionnières.** La principale différence entre un paysage de savane et un paysage de forêt réside dans le caractère plus ou moins ouvert ou fermé et donc dans la quantité de lumière disponible au sol. Le flux de lumière est en effet déterminant pour la photosynthèse, c'est-à-dire le processus de production de matière végétale. Les espèces de savane (ligneuses et herbacées) sont héliophiles : il s'agit d'espèces qui ont besoin dès leur stade juvénile de l'importante quantité de lumière disponible en savane pour se développer [80]. Le besoin en lumière des espèces de forêt est beaucoup plus variable [80] : certaines espèces sont héliophiles et s'installent essentiellement dans les trouées en forêt qui résultent de la chute d'un gros ou de plusieurs arbres (chablis) ; d'autres sont sciaphiles (elles peuvent germer et persister longtemps à l'ombre en attendant une possibilité d'atteindre la canopée) ; et il existe bien sûr tout une gamme d'espèces plus ou moins héliophiles. Du fait de cette caractéristique, ces espèces ont une fonction dans la dynamique de la forêt [89]. Lorsque survient une perturbation dans une forêt (chute d'un arbre), les héliophiles colonisent les trouées, croissent vite et leur couronne se développant, comblent le trou. Ce sont alors les espèces plus sciaphiles qui peuvent s'installer. Au bout de quelques dizaines d'années, les héliophiles meurent (leur durée de vie est en général faible et ils peuvent également être surcimés par des espèces qui se sont installées plus tard). La forêt retrouve alors lentement sa structure d'avant la perturbation. Dans le contexte de l'évolution de la lisière forêt-savane, certaines espèces héliophiles de forêt ont la capacité de s'installer en savane : ce sont les espèces pionnières de la forêt. Selon les régions, ce sont différentes espèces qui assurent cette fonction (voir table 2.4).

**Installation d'espèces pionnières.** Les graines des espèces de conquête sont généralement produites en grande quantité et dispersées soit par le vent, soit par les oiseaux, ce qui leur assure une dissémination à longue portée [70]. Les

Lieu	Pionniers	Références
Est-Cameroun	<i>Albizzia sp.</i>	[65, 116]
Gabon/Congo	<i>Aucoumea klaineana</i>	[52]
Bélize	<i>Swietenia macrophylla</i> , <i>Xylo-</i> <i>pia frutescens</i>	[72]
NO Argentine	<i>Alnus acuminata</i>	[63]
Ghats occidentaux (Inde)	<i>Aporosa lindleyana</i>	[92]

TAB. 2.4 – Quelques exemples d’espèces ligneuses pionnières (arbres de forêt ayant la capacité de s’installer en savanes).

graines sont donc réparties sur une grande partie de la savane périforestière avec des densités plus importantes près des arbres. En effet les graines anémochores tombent préférentiellement au pied de l’arbre qui les produit et sont également facilement arrêtées par le feuillage des arbres et tombent à leur pied. Concernant les graines zoochores, les arbres établis constituent des perchoirs pour les oiseaux ou attirent les animaux qui déposent préférentiellement les graines dans le voisinage [45].

La probabilité de germination d’une graine dépend des conditions climatiques (humidité, insolation) et d’un facteur pédologique. Il existe en effet des zones propices à l’installation d’espèces de forêt, comme les termitières (fossiles ou actuelles) avec leur terre remaniée, humide et enrichie [74, 116]. D’autre part, il y a également des zones défavorables (par exemple les affleurements de roche). La germination dépend enfin de la luminosité au sol et donc de la densité des strates arbustives et herbacées.

**Croissance et organisation.** Les espèces héliophiles sont à croissance rapide. Elles dépassent rapidement le tapis graminéen (qui peut aller jusqu’à 2 mètres de hauteur). Puis l’arbre prend de l’envergure : le feuillage se développe en couronne et se densifie. L’ombre portée au sol y diminue la luminosité. Le tapis herbacé, très héliophile, diminue alors de hauteur jusqu’à disparaître totalement.

Les arbres ne sont en général pas isolés en savane périforestière : ils forment des bosquets. Cette organisation est essentiellement due à la présence de zones attractives et à la dissémination préférentielle près des arbres déjà présents.

#### 2.4.2 Du bosquet à la forêt

**Installation d’espèces sciaphiles.** Un bosquet d’arbres héliophiles attire les animaux : les oiseaux y font halte, les petits mammifères viennent le visiter. Ils y apportent, dans leurs déjections ou pour les enfouir, les graines d’espèces héliophiles de la forêt. L’ombre portée au sol par les couronnes permet la germination de ces graines, puis la croissance des plantes. La diminution de la strate herbacée limite également la compétition herbe-arbre pour les ressources du sol.

**Disparition des espèces héliophiles.** Comme dans la régénération à l’intérieur de la forêt, trois facteurs expliquent la supplantation des espèces de

conquête par les espèces sciaphiles : le dépérissement naturel (les espèces héliophiles ont une durée de vie courte, de quelques dizaines d'années généralement), l'absence de régénération, puisque l'ombre portée par les espèces héliophiles empêche le recrutement de nouvelles pousses, et le dépérissement dû à la compétition pour la lumière avec les espèces de succession secondaires (sciaphiles dans leur stade juvénile et héliophiles à l'âge adulte).

### 2.4.3 Dynamique à la lisière forêt-savane

**Structure de la lisière.** Selon une coupe transversale d'une centaine de mètres à la frontière entre la forêt et la savane, il apparaît que la transition se fait par étapes (figure 2.6). La première séquence de végétation à partir de la forêt (zone 1), est peuplée d'arbustes et de petits arbres essentiellement héliophiles, culminant à environ 20 mètres (zone 2). La luminosité forte permet également la croissance de lianes qui s'enchevêtrent et rendent la zone quasi impénétrable. En avant de cette zone de lisière, on trouve une bande de plantes herbacées de forêt (de la famille de Marantaceae et Zingiberaceae) et de fougères d'une hauteur de 1,5 mètres à 3 mètres (zones 3 et 4).

Les phases de succession détaillées précédemment se retrouvent en lisière de forêt : des espèces héliophiles germent puis poussent en avant du front de forêt, où la luminosité est suffisante. Lorsqu'elles ont développé une couronne suffisamment large et dense, l'ombre portée permet la germination des graines d'espèces sciaphiles à dissémination zoochore (par les animaux) mais également barochore (la graine tombe au pied de l'arbre et roule au maximum sur quelques mètres). Ces espèces finissent par supplanter les arbres héliophiles. On a ainsi progression du front de forêt sur la savane.

## 2.5 Le processus de feu

Le feu est, on l'a vu, caractéristique des savanes : sans être allumé à dessein, c'est la principale perturbation anthropique, le principal frein à l'afforestation (planche 5).

### 2.5.1 La propagation du feu dans la savane

La principale matière inflammable de la savane est le couvert herbacé (zone 5 de la figure 2.6). Son degré d'humidité conditionne la possibilité de propagation de feu.

Dans la savane, ce couvert est essentiellement composé de graminées (Poaceae) et s'assèche au cours de la saison sèche. Ainsi, un feu est vite arrêté en début de saison sèche, lorsque l'herbe est encore humide, mais prend une ampleur considérable, pouvant parcourir des centaines d'hectares en fin de saison sèche. A la lisière, on trouve des plantes très humides qui ne sont sensibles au feu qu'à l'occasion de longues saisons sèches : fougères, Zingiberaceae et Marantaceae (zones 2 et 3, figure 2.6). Ainsi, elles s'enflamment plus difficilement et constituent une zone pare-feu entre savane et forêt.

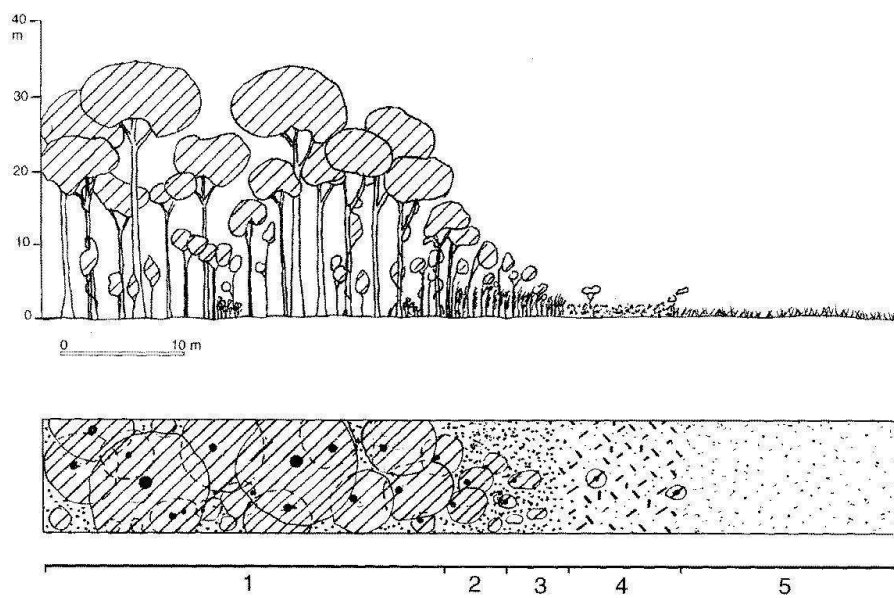


FIG. 2.6 – Lisière, exemple au Cameroun. Haut : Coupe transversale de la lisière. Bas : Recouvrement du sol par les couronnes. 1. Zone de forêt jeune, occupée par des pionniers adultes, recouvrement > 100%. 2. Jeunes pionniers, peu de couvert herbacé. 3. Fourré occupé par des herbes héliophiles de forêt (Marantaceae, Zingiberaceae, fougères) et quelques pousses de pionniers. 4. Fourré à *Chromolaena Odorata*, herbe envahissante commune dans les savanes d’Afrique centrale. 5. Savane. D’après Youta Happi [116].

Dans les bosquets de savane ou dans la forêt, le couvert herbacé diminue à mesure que la végétation se densifie. La quantité de matière inflammable étant réduite, les feux y sont de moindre importance. Ainsi le feu ne peut pas pénétrer très loin dans la forêt.

### 2.5.2 L'effet sur les arbres

Si c'est le couvert herbacé qui permet la propagation du feu, c'est son effet sur les plantes ligneuses qui est intéressant dans l'étude de la dynamique du contact forêt-savane parce qu'il affecte le processus de colonisation de la savane par la forêt.

Quand le feu atteint un arbre, il a deux moyens de le tuer : en le brûlant totalement jusqu'au feuillage ou en chauffant suffisamment la base du tronc pour détruire le réseau d'approvisionnement de la partie supérieure. Deux caractéristiques de l'arbre influent donc très fortement sur sa capacité de survie au feu : sa taille et l'épaisseur de son écorce, à quoi il faut rajouter deux paramètres extérieurs : la violence du feu (la puissance dégagée) et la hauteur du couvert herbacé.

**Arbres de savane.** Les arbres de savane sont adaptés à leur environnement [69]. Ils sont très héliophiles, pas très hauts mais développent très vite une écorce épaisse qui protège l'intérieur du tronc. Lorsque le feu les atteint, les feuilles sont généralement brûlées, l'écorce est complètement noircie en surface, mais l'arbre étant toujours vivant, ses feuilles repoussent à la saison humide suivante.

**Arbres pionniers en savane.** Les arbres d'espèces de forêt qui colonisent la savane ne développent pas d'écorce épaisse aussi précocement que les arbres de savane et sont donc très sensibles au feu [69]. Ainsi, les plantules et petits arbres installés en savane qui ne sont pas plus hauts que le couvert herbacé brûlent complètement lorsqu'ils sont atteints par le feu. Les feux courants détruisent la partie aérienne de la plante mais la partie souterraine peut survivre et le système racinaire continuer de se développer. Des rejets à partir des racines apparaissent ainsi à la saison humide. Finalement, la plante s'organise en un bouquet de tiges vivantes ou brûlées et les tiges extérieures constituent une sorte de bouclier pour les tiges centrales [116].

Lorsque l'arbre pionnier surcime le couvert herbacé, son feuillage se trouve à l'abri des flammes [58, 83]. Il n'est alors vulnérable que parce que son écorce est encore mince. Au fur et à mesure qu'il grandit, son écorce s'épaissit. Dans le même temps, le couvert herbacé diminue avec la densification de la couronne : le feu est donc moins intense lorsqu'il atteint l'arbre. Les deux phénomènes se combinent pour que la possibilité de survie au feu d'un arbre augmente rapidement avec son stade de développement [83].

**Les lisières.** Comme on l'a vu, le peuplement à fougères, Zingiberaceae et Marantaceae (ainsi que la plante introduite en Afrique *Chromolaena odorata*) fait office de pare-feu lorsque la saison sèche n'est pas trop longue (typiquement



inférieure à 5 mois). De plus, derrière, la zone de lisière présente un couvert herbeux très bas : la lisière a donc un réel effet protecteur. Néanmoins, à la fin des saisons sèches importantes, le sol de la forêt peut être couvert de feuilles mortes sèches susceptibles de brûler et d'amener le feu dans la forêt.

## 2.6 Conclusion

Les phénomènes décrits dans ce chapitre interviennent sur des échelles imbriquées. A l'échelle globale, le climat détermine le potentiel d'afforestation de chaque zone (saison sèche suffisamment courte et montant des précipitation suffisant). Le temps selon lequel il fluctue se compte en siècles. C'est à cette même échelle que se dessine la répartition des grands massifs équatoriaux et des savanes humides péreforestières. Ce potentiel est modulé à l'échelle du paysage par les conditions locales (altitude, microclimats, nature du sol, etc.). C'est à cette échelle que l'on perçoit l'évolution en quelques dizaines d'années du paysage sur les photographies aériennes ou les images satellites. Mais c'est à l'échelle de la plante que se déroulent les processus menant à la transgression : installation, croissance ou combustion d'un arbre pionnier. Ces processus, rythmés par la succession annuelle des saisons sèches et humides, sont eux-mêmes tributaires d'événements intervenant à une échelle temporelle plus fine encore : la propagation du feu, le transport des graines, les averses, etc.

De ces échelles emboîtées, laquelle choisir pour modéliser la dynamique de l'interface entre forêts et savanes ? Il apparaît que pour le but recherché – expliquer comment la combinaison des facteurs naturel et anthropiques dessine le paysage – il faut décrire l'évolution d'un paysage sur quelques dizaines ou centaines d'années. Le modèle FORSAT comporte alors deux modules : la succession (le processus naturel) et la perturbation par le feu (processus anthropique) et le pas de temps d'un an apparaît naturellement. Les processus à une échelle plus large (climat, sol, etc.) sont considérés comme des paramètres extérieurs du modèle. Les processus à une échelle plus fine (allocation de l'eau et des composés chimiques, propagation du feu, etc.) ne sont pas décrits explicitement mais sont pris en compte à travers leurs effets moyens : croissance, germination, perturbation par le feu.



# Chapitre 3

## Propagation du feu

---

*Un immense serpent de feu rampe lentement, dévorant sur son passage l'épaisse couche végétale qui frémit. Au crépitement de la flamme dans l'herbe sèche se joint l'incessant frémissement des insectes en fuite. Parfois, une gerbe d'étincelles jaillit et une multitude de points lumineux qui s'évanouissent aussitôt donnent l'illusion d'un merveilleux feu d'artifice. [...]*

*A distance, dans la zone déjà brûlée, la terre semble fumante. Puis, l'anneau de feu se divise, se fragmente, sa morsure devient plus irrégulière et bientôt il n'y aura plus que quelques torches avec parfois des éclatements de lumière.*

— Yves Monnier (Les effets des feux de brousse sur une savane préforestière de Côte-d'Ivoire).

Le module anthropique du modèle FORSAT de la dynamique de l'interface forêt savane doit représenter la perturbation que génère un feu courant de savane : l'action d'un incendie propagé par le couvert herbacé sur les espèces pionnières de la forêt qui y sont disséminées. La construction d'un modèle simple de la dynamique d'un incendie et son analyse permet de trouver la façon la plus simple de représenter cette perturbation.

### 3.1 Description du feu de végétation

**Définitions.** Selon la définition de Trabaud [109], « l'incendie est une combustion qui se développe sans contrôle, dans le temps et dans l'espace ».

On distingue trois types de feux :

- les feux de surface ou feux courants, qui brûlent la litière et ne consomment que la végétation herbacée et les broussailles ;
- les feux de cimes, qui avancent d'une cime à l'autre ;
- les feux de sol, qui consomment l'humus, c'est-à-dire la matière organique en décomposition.

Trois éléments sont nécessaires au feu, connus sous le terme de triangle du feu : du combustible (ici la végétation), du comburant (de l'oxygène) et une

source de chaleur pour initier la combustion. Un feu est un mécanisme auto-entretenu. La matière enflammée se consume : c'est l'oxydation de la matière qui entraîne la destruction de la végétation. Cette combustion est une réaction très exothermique et la chaleur est transmise principalement par convection et rayonnement à la végétation alentour. Des brandons enflammés peuvent également être transportés par le vent et donc apporter la chaleur du feu loin du front de flamme. Soumis à cette source de chaleur, le matériel végétal en contact peut s'enflammer à son tour.

**Variables et paramètres.** Deux propriétés de la végétation sont déterminants pour la description du feu [109] : l'inflammabilité (le temps nécessaire pour initier l'inflammation) et la combustibilité (le temps entre l'inflammation et l'extinction).

Les conditions extérieures sont également déterminantes : le feu a tendance à remonter les pentes et est poussé par le vent, tandis que l'humidité du matériel végétal, liée à l'humidité de l'air, ralentit sa progression.

La variable décrivant le feu est généralement la vitesse de propagation du front de flamme (en km/h ou cm/s). Néanmoins, d'autres variables sont quelquefois utilisées en complément : les temps de combustion et d'inflammation (en secondes), la profondeur et la hauteur de la flamme (en mètres), l'énergie ou la puissance dégagée lors de la combustion (en kJ ou kW par gramme de combustible).

**Influence du vent.** Le vent influence le feu de différentes façons. Il diminue le temps de combustion, en accroissant la quantité d'oxygène arrivant au combustible en train de brûler : le feu est donc plus violent. Il « pousse » également la flamme, qui s'incline dans le sens du vent. Les combustibles situés sous le vent sont plus facilement enflammés et la vitesse de propagation augmente. Il peut en outre transporter des brandons enflammés et initier un foyer secondaire. Sans anticiper sur la description des différents types de modèles de propagation d'incendie, les mesures d'évolution de la vitesse de propagation en fonction de la vitesse du vent peuvent être très différentes. La courbe reliant la vitesse du feu et la vitesse du vent est toujours croissante : dans certains cas, elle est convexe (la pente de la courbe augmente également, comme une exponentielle) ; dans d'autres, elle est concave (la pente décroît).

**Influence de la déclivité.** Il est bien connu qu'un feu a tendance à remonter les pentes : les combustibles situés en amont du front de flamme sont plus proches de la flamme (la flamme est inclinée par rapport au sol, comme elle l'est sous l'effet du vent), reçoivent plus de chaleur (par rayonnement et par convection) et s'enflamment plus rapidement. Selon Trabaud [109], l'influence de la pente est déterminante pour les feux de faible intensité (feux courants) mais tout à fait secondaire dans le cas des feux de cimes.

**Influence de la teneur en eau du combustible.** La teneur en eau des végétaux détermine à la fois leur inflammabilité et leur combustibilité [82].

	Biferno	Penteli	Cuenca	Percolation
DF de la surface brûlée	1.90(5)	1.93(5)	1.95(5)	$\frac{91}{48}$ (= 1.896)
DF de l'enveloppe	1.30(5)	1.32(5)	1.34(5)	$\frac{7}{4}$ (= 1.75)
DF du périmètre	1.30(5)	1.33(5)	1.34(5)	$\frac{4}{3}$ (= 1.333)

TAB. 3.1 – Comparaisons des dimensions fractales (DF) de surfaces brûlées, de l'enveloppe et du périmètre de ces surface pour trois feux de végétation [43] et des mêmes caractéristiques pour l'amas de percolation au seuil critique.

Le temps d'inflammabilité augmente ainsi avec la teneur en eau et devient infini pour une valeur appelée humidité d'extinction. Le temps de combustion augmente lui aussi avec la teneur en eau. La vitesse de propagation diminue, elle, avec cette teneur en eau, jusqu'à l'extinction pour une valeur seuil.

L'humidité de l'air et la température extérieure influencent directement l'humidité du combustible. Ainsi, la nuit la température baisse et l'air devient plus humide, ralentissant le feu et quelquefois l'éteignant.

Généralement, les expériences montrent une décroissance convexe pour les faibles valeurs d'humidité relative puis concave aux alentours de l'humidité d'extinction.

**Propriétés des régions brûlées.** Grâce aux moyens de télédétection actuels, on a accès avec une résolution toujours meilleure aux formes des surfaces brûlées dans les moyens et grands incendies [43, 62, 67].

Caldarelli et coll. [43] ont ainsi pu calculer les dimensions fractales des surfaces brûlées lors de trois incendies de forêt. Ils ont montré que celle de leur périmètre en particulier était compatible avec celle de l'amas critique de la percolation (table 3.1).

Haydon et coll. [67] ont eux trouvés une relation entre les aires ( $S$ ) et les périmètres ( $P$ ) des surfaces brûlées du type :

$$S \propto P^\alpha, \quad (3.1)$$

où  $\alpha = 0,7$ . Cette valeur est également compatible avec les résultats de la percolation pour laquelle  $\alpha = 0,70$ .

## 3.2 Modèles

Disposer d'un bon modèle de propagation d'incendies est un enjeu considérable pour une lutte efficace contre le feu. C'est d'ailleurs dans ce cadre qu'ont été bâtis les premiers modèles. Aujourd'hui, les modèles de dynamique de végétation ont besoin d'inclure un sous-modèle incendie (soit pour prédire les zones à risque, soit, comme dans le cas présent, pour déterminer l'influence de la perturbation par le feu sur la dynamique du paysage). Du fait des besoins et des attentes différents, mais également des « backgrounds » des modélisateurs, les modèles de feu de la littérature sont très différents.

### 3.2.1 Modèles déterministes

**Modèles énergétiques.** Dans les modèles énergétiques, une équation de propagation est dérivée d'un bilan d'énergie en chaque point : la variation d'énergie interne  $dQ_{int}$  est égale à la somme des énergies échangées avec son environnement (avec l'air ambiant  $dQ_{amb}$  et les zones de végétations  $dQ_{dif}$ ) et de l'énergie  $dQ_{comb}$  dégagée par la combustion lorsque celle-ci a lieu :

$$dQ_{int} = dQ_{amb} + dQ_{comb} + dQ_{dif}. \quad (3.2)$$

Il s'agit alors d'exprimer les différents termes de l'équation en fonction de paramètres connus. Des hypothèses sur le déroulement de la combustion sont nécessaires pour « fermer » le système d'équations qui en découle (c'est-à-dire pour que toutes les variables soient déterminées par le modèle). En particulier, il faut expliciter le transfert de chaleur (convection ou radiation) et le déroulement de la combustion (notamment la perte de masse de combustible par unité de temps pendant la combustion). Il est alors possible de déduire une équation (ou un système d'équations) de l'évolution d'une variable d'état (par exemple la température).

Un des modèles les plus simples est celui de Balbi et coll. [39] basé sur les hypothèses suivantes :

- la combustion est initiée à une température donnée  $T_{comb}$  ;
- l'enthalpie de la réaction  $H$  est constante ;
- la chaleur dégagée pendant la combustion est proportionnelle à la quantité de combustible brûlée.

Cela mène facilement à l'équation suivante sur la température :

$$\underbrace{m \frac{\partial T}{\partial t}}_{(1)} = \underbrace{-k(T - T_a)}_{(2)} - \underbrace{H \frac{\partial \rho}{\partial t}}_{(3)} + \underbrace{K \Delta T}_{(4)}, \quad (3.3)$$

où  $m$  est la chaleur spécifique du combustible,  $T_a$  est la chaleur ambiante,  $k$  le coefficient de transport convectif de la chaleur,  $K$  le coefficient de transfert de chaleur de la zone de combustion vers son voisinage et  $\rho$  la masse du combustible.

Le changement de température (1) est dû à la combinaison de trois termes : l'échange de chaleur avec l'air ambiant (2), la chaleur recue de la végétation alentour (4) et la chaleur dégagée lors de la combustion (3). Lorsqu'il n'y a pas de combustion ( $\rho$  est constant,  $\Delta T = 0$ ,  $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$ ), la végétation équilibre sa température avec la température ambiante.

Il faut ajouter un modèle de la décroissance de la masse combustible au cours de la réaction :

$$\rho(t) = \rho_0 \text{ si } t < t_{comb} \quad (3.4)$$

$$\rho_0 \exp[-\alpha(t - t_{comb})] \text{ sinon.} \quad (3.5)$$

Ainsi, le terme (3) de l'équation (3.3) est nul tant que la combustion n'a pas démarré puisqu'alors la masse de combustible est constante ( $t < t_{comb}$ , où  $t_{comb}$  est l'instant où la température atteint pour la première fois  $T_{comb}$ ) et est positif ensuite (car la masse de combustible décroît lors de la combustion).

**Modèles empiriques.** Les modèles empiriques sont de deux ordres. Certains modèles sont réellement empiriques : après plusieurs mesures de vitesse de propagation dans des conditions différentes (d'humidité, de pente, de vent, etc.) une régression est menée entre paramètres de contrôle et vitesse de propagation. De nombreux exemples existent, parmi lesquels le modèle de McArthur [82] : il est constitué d'un disque donnant une classe de risque d'incendie en fonction de paramètres environnementaux et climatiques. Le deuxième catégorie de modèle est dite semi-empirique. Ces modèles s'inspirent tous plus ou moins du modèle de Rothermel et Albini [31, 96]. Dans celui-ci, la vitesse de propagation  $R$  est exprimée comme le rapport entre la puissance libérée par la combustion d'une unité de surface (orthogonale à la direction de propagation) et la chaleur  $H$  nécessaire pour initier la combustion d'une unité de volume de combustible. La puissance par unité de surface se décompose elle-même comme le produit de :

1. l'intensité de la réaction  $I_r$  ;
2. la fraction de cette intensité qui est effectivement propagée  $\xi$  ;
3. un facteur correctif pour tenir compte de la pente et du vent  $(1 + vl)$ .

Soit :

$$R = \frac{I_r \cdot \xi \cdot (1 + vl)}{H}. \quad (3.6)$$

De nombreuses expériences ont été menées pour donner des modèles empiriques de chacun des termes de l'expression (3.6). Dans sa revue des équations du modèle, Bachmann [37] dénombre au total entre 16 et 30 paramètres, selon le nombre de strates de combustibles considérés : entre autres, la quantité de combustible disponible, l'épaisseur de la couche combustible, le rapport de la superficie du combustible à son volume, la densité, la teneur en eau et du contenu en éléments minéraux, la vitesse du vent, la pente ou l'humidité d'extinction. L'équation (3.6) est en fait la 71<sup>ième</sup> du modèle et 32 des 70 équations intermédiaires sont empiriques.

Certains modèles spatialisés [40] utilisent le modèle de Rothermel pour déterminer la vitesse de propagation d'un incendie en chaque point de la ligne de feu et représentent ainsi l'évolution des surfaces brûlées.

### 3.2.2 Modèles stochastiques

**Percolation de sites.** Très vite après les premiers pas de la théorie de la percolation, Albinet et coll. [30] l'ont appliquée pour construire des modèles de propagation de feu. Le paysage est divisé (discrétisé) en cellules parmi lesquelles le combustible est distribué : chacune d'entre elles se trouvant dans l'état susceptible (présence de combustible) avec une probabilité  $p$  ou dans l'état résistant (absence de combustible) avec une probabilité  $1 - p$ . Un site susceptible est choisi comme départ de feu et l'ensemble des cellules susceptibles connectées à la cellule de départ (l'amas) représente la région brûlée.

Ce modèle statique peut facilement être adapté en modèle dynamique. Pour Albinet et coll. [30], sur la même carte définie précédemment, une cellule enflammée dégage de l'énergie jusqu'à combustion totale (le temps de combustion est constant) dont une partie est transmise aux cellules voisines qui s'enflamment